

## Kavitationsdetektion mittels self-sensing-ultraschallwandler

Article (Published Version)

Bornmann, Peter, Hemsel, Tobias, Sextro, Walter, Memoli, Gianluca, Hodnett, Mark and Zeqiri, Bajram (2015) Kavitationsdetektion mittels self-sensing-ultraschallwandler. *Technisches Messen*, 82 (2). pp. 73-84. ISSN 0171-8096

This version is available from Sussex Research Online: <http://sro.sussex.ac.uk/id/eprint/72507/>

This document is made available in accordance with publisher policies and may differ from the published version or from the version of record. If you wish to cite this item you are advised to consult the publisher's version. Please see the URL above for details on accessing the published version.

### **Copyright and reuse:**

Sussex Research Online is a digital repository of the research output of the University.

Copyright and all moral rights to the version of the paper presented here belong to the individual author(s) and/or other copyright owners. To the extent reasonable and practicable, the material made available in SRO has been checked for eligibility before being made available.

Copies of full text items generally can be reproduced, displayed or performed and given to third parties in any format or medium for personal research or study, educational, or not-for-profit purposes without prior permission or charge, provided that the authors, title and full bibliographic details are credited, a hyperlink and/or URL is given for the original metadata page and the content is not changed in any way.

## Beiträge

Peter Bornmann\*, Tobias Hemsel, Walter Sextro, Gianluca Memoli, Mark Hodnett und Bajram Zeqiri

# Kavitationsdetektion mittels Self-Sensing-Ultraschallwandler

Cavitation detection by a self-sensing ultrasound transducer

**Zusammenfassung:** Eine Vielzahl von Prozessen in der Chemie und Verfahrenstechnik kann durch Ultraschall positiv beeinflusst werden. Oftmals ist ultraschallinduzierte Kavitation der Hauptwirkmechanismus für die positiven Effekte der Beschallung. Daher ist es notwendig die Kavitationsaktivität während des Prozesses zu quantifizieren um die Beschallung für den jeweiligen Prozess optimal gestalten und überwachen zu können. Eine Möglichkeit der prozessbegleitenden Kavitationsdetektion ist die Auswertung der akustischen Emissionen von oszillierenden und kollabierenden Kavitationsblasen mittels Drucksensoren in der Flüssigkeit. Raue Prozessrandbedingungen wie hohe Temperaturen oder aggressive Flüssigkeiten erschweren es jedoch geeignete Sensoren zu finden. Als Alternative wurde daher die Nutzbarkeit der Rückwirkung von Kavitationseignissen auf das elektrische Eingangssignal des Ultraschallwandlers zur Quantifizierung von Kavitation untersucht. Die experimentelle Analyse hat ergeben, dass das Einsetzen und in einigen Fällen auch die Art der Kavitation auf Basis der Rückwirkung auf das Stromsignal des Ultraschallwandlers bestimmt werden kann. Die Stärke der Kavitation war hingegen nicht aus den Stromsignalen abzuleiten.

**Schlüsselwörter:** Self-Sensing, Kavitationsdetektion, Sonochemie, Ultraschallwandler.

**Abstract:** Many processes in chemistry can be enhanced by ultrasound assistance. In many cases ultrasound induced cavitation is the main reason for these enhance-

ments. Therefore, it is desired to quantify cavitation activity during the process to optimize sonication for various processes and monitor cavitation activity throughout the process. One possibility to monitor cavitation activity is to measure the acoustic emissions of oscillating and collapsing cavitation bubbles by hydrophones in the liquid. However, harsh environments often coming along with chemical processes complicate the application of sensors in the liquid. Thus, this contribution discusses the applicability of the feedback of cavitation on the driving signals of the ultrasound transducer itself as possible alternative for cavitation monitoring. The measurement results show that the threshold of inertial cavitation could be detected based on the current signal of the transducer. Some indicators can even be used to distinguish between the two types of cavitation. However, to evaluate the strength of cavitation the application of a cavitation sensor is recommended.

**Keywords:** Self-sensing, cavitation detection, sonochemistry, ultrasound transducer.

DOI 10.1515/teme-2015-0017

Eingang 8. Dezember 2014; angenommen 8. Januar 2015

## 1 Anwendungsfeld und Motivation

Die Nachfrage nach angepassten und neuen Werkstoffen erfordert mitunter effizientere und verbesserte Herstellungsverfahren für diese Werkstoffe. So gibt es aufgrund der EG-Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten eine gesteigerte Nachfrage nach bleifreien piezoelektrischen Werkstoffen [1, 2].

Eine vielversprechende Alternative zu den weit verbreiteten piezoelektrischen Blei-Zirkonat-Titanat-Keramiken (PZT) sind bleifreie Kaliumniobat-Keramiken wie  $\text{KNO}_3$ , deren Herstellung jedoch zeitaufwendig ist und

\*Korrespondenzautor: Peter Bornmann, Universität Paderborn, Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik, Paderborn, E-Mail: peter.bornmann@upb.de

Tobias Hemsel, Walter Sextro: Universität Paderborn, Lehrstuhl für Mechatronik und Dynamik, Paderborn

Gianluca Memoli, Mark Hodnett, Bajram Zeqiri: National Physical Laboratory, Teddington, United Kingdom

deren Eigenschaften noch nicht hinreichend optimiert sind, um PZT-Keramiken vollständig ersetzen zu können. Die herkömmliche Herstellung basierend auf Festkörperreaktionen ist bei  $\text{KNbO}_3$  problematisch, da sich aufgrund von flüchtigen Anteilen die Stöchiometrie nicht genau steuern lässt. Diese ist jedoch wesentlich zur Beeinflussung der Eigenschaften der resultierenden Keramiken. Vorteile bietet die Herstellung von  $\text{KNbO}_3$  mit dem Hydrothermalverfahren, da sich damit die Stöchiometrie und somit die Eigenschaften des resultierenden Materials genau einstellen lassen. Zudem werden beim Hydrothermalverfahren Verunreinigungen durch das Kugelmahlen vermieden. Das Hydrothermalverfahren ist jedoch zeitintensiv und daher trotz der Vorteile nicht effizient. Eine deutliche Verbesserung kann durch Ultraschallunterstützung erzielt werden. Dadurch lassen sich die Prozesszeiten auf ca. 1/4 reduzieren und die Prozessrandbedingungen wie das nötige Temperaturniveau mildern. Zudem konnte ein Einfluss des Ultraschalls auf die Morphologie des resultierenden  $\text{KNbO}_3$ -Pulvers festgestellt werden, welcher sich positiv auf die Sinter Eigenschaften und somit auf die Eigenschaften der resultierenden Keramiken auswirkt [3, 4].

Ein sonochemischer Reaktor für das ultraschallunterstützte Hydrothermalverfahren ist in Abbildung 1 dargestellt. Er besteht im Wesentlichen aus einem Autoklaven mit integriertem Ultraschallwandler. Das dargestellte System eignet sich für Prozesse im Labormaßstab mit einem Flüssigkeitsvolumen von ca. 70 mL. Er wird komplett in einem Wärmeschrank betrieben, um das für die Reaktion notwendige Temperatur- und Druckniveau einzustellen. Ein Einsatz aus reaktionsträgem Teflon im Inneren des

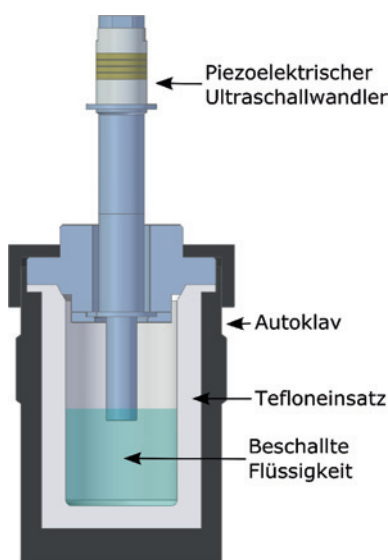
Autoklaven ermöglicht die Verwendung einer Vielzahl an Flüssigkeiten. Die durch den Ultraschallwandler erzeugte Schalldruckamplitude kann in einem weiten Bereich unter- und oberhalb der Kavitationsschwelle variiert werden. Durch die Möglichkeit der Kombination von Druck, Temperatur und Ultraschall eignet sich der sonochemische Reaktor zur Analyse der Wirkung von Ultraschall in vielfältigen verfahrenstechnischen Anwendungen.

Die Optimierung der Beschallung gestaltet sich jedoch als schwierig, da das System aufgrund der geschlossenen Bauweise und der rauen Prozessrandbedingungen wie Druck, Temperatur und alkalischen oder ätzend Flüssigkeiten schwer für Sensorik zugänglich ist. Zudem gibt es derzeit kein standardisiertes Messverfahren zur Quantifizierung von Kavitation, so dass die Optimierung der Beschallung aufwendig über die Analyse des Reaktionsproduktes erfolgen muss. Auf dieser Basis ist es jedoch schwierig die Beschallungszustände auf andere Systeme zu übertragen bzw. die Ergebnisse mit denen aus anderen Systemen zu vergleichen. Ziel ist es daher, ein Messverfahren bereitzustellen, welches es ermöglicht die Beschallung und die Kavitationsaktivität prozessbegleitend und möglichst rückwirkungsfrei zu messen ohne Sensoren in der Flüssigkeit platzieren zu müssen.

## 2 Ultraschallinduzierte Kavitation

Kavitation beschreibt die Bildung von Blasen in einer Flüssigkeit, wenn der Druck einen bestimmten Grenzwert unterschreitet. Mitunter wird dieser Vorgang auch als Zerreiß der Flüssigkeit beschrieben. Der notwendige Unterdruck kann, entsprechend dem Bernoulli'schen Gesetz, durch Flüssigkeitsströmungen, beispielsweise in Kreisel-pumpen oder an Schiffsschrauben entstehen, oder durch ein Schallfeld. Ersteres wird als hydrodynamische Kavitation bezeichnet und ist in den genannten Anwendungsfeldern unerwünscht, da sie zu erosiven Schäden an den Pumpen und Schiffsschrauben führt. Im Gegensatz zur hydrodynamischen Kavitation wird akustische Kavitation gezielt durch ein Schallfeld erzeugt und technisch genutzt. Anwendungsfelder sind die Ultraschallreinigung, das Herstellen von Emulsionen und Dispersionen sowie verschiedene Prozesse in der Chemie und Verfahrenstechnik [5, 6].

Zur Entstehung akustischer Kavitation muss eine ausreichend große Schalldruckamplitude im Schallfeld vorherrschen, um in der Unterdruckphase Kavitationsblasen zu erzeugen. Ob und bei welcher Unterdruckamplitude Kavitationsblasen entstehen hängt von den Eigenschaften der Flüssigkeit, den Randbedingungen und dem Anteil an Kavitationskeimen in der Flüssigkeit ab. Daher sind all-



**Abbildung 1:** Sonochemischer Reaktor: Autoklav mit integriertem Ultraschallwandler.

gemeine Prognosen über die Kavitationsschwelle in unterschiedlichen Flüssigkeiten kaum möglich. In Abhängigkeit von der Schalldruckamplitude können Kavitationsblasen nach ihrer Entstehung für einige Perioden oszillieren und dabei wachsen bis sie in kleinere Blasen zerfallen oder zur Flüssigkeitsoberfläche aufsteigen. Dies wird als stabile Kavitation bezeichnet. Bei höheren Schalldruckamplituden kollabieren die Kavitationsblasen schon kurz nach ihrer Entstehung in der Überdruckphase des Schalldrucks sehr heftig. Dies wird als transiente Kavitation bezeichnet. Beim Kollaps der Kavitationsblasen kommt es kurzzeitig lokal zu sehr hohen Drücken bis 100 MPa und Temperaturen bis 5000 K und somit auch zu extremen Aufheiz- und Abkühlraten von  $10^{10} \text{ K s}^{-1}$  [7]. Diese einzigartigen Reaktionsbedingungen machen Kavitation attraktiv für chemische und verfahrenstechnische Prozesse und können zur Steigerung der Effizienz und zur Verbesserung des Reaktionsproduktes eingesetzt werden. Kollabieren Kavitationsblasen in der Nähe einer Oberfläche so kommt es zu einem asymmetrischen Kollaps und zur Ausbildung oberflächengerichteter Flüssigkeitsstrahlen, auch Micro Jets genannt, welche beispielsweise bei der Ultraschallreinigung, bei der Extraktion oder beim Imprägnieren technisch genutzt werden [6].

### 3 Verfahren zur Quantifizierung von Kavitation

Trotz der vielfältigen Einsatzfelder akustischer Kavitation ist es bislang oft nicht möglich, die genaue Wirkweise der Kavitation auf den jeweiligen Prozess zu beschreiben, da die Detektion und Quantifizierung von Kavitation sehr komplex ist. Daraus resultiert die Motivation, die Kavitationsaktivität messtechnisch zu quantifizieren, um die Beschallung für unterschiedliche Prozesse optimieren zu können und um die Ergebnisse auf andere, beispielsweise skalierte Systeme, übertragen zu können. Zudem ist es gerade für zeitintensive oder kontinuierliche Prozesse von Interesse, die Kavitationsaktivität als Betriebsparameter prozessbegleitend zu überwachen.

Da es kein standardisiertes Verfahren zur Messung von Kavitation gibt, haben sich verschiedene Methoden in Abhängigkeit der jeweiligen Applikation etabliert. Dabei wird Kavitation indirekt durch ihre Wirkung charakterisiert. Die Ultraschallreinigung basiert auf kavitationsinduzierter Erosion an der zu reinigenden Oberfläche. Die Erosion an Probekörpern wird daher als Maß für die Reinigungswirkung verwendet. Im einfachen Fall wird eine dünne Aluminiumfolie für eine bestimmte Zeit im Schall-

feld platziert. Kavitation führt zu einer Perforation der Folie und das entstandene Erosionsmuster gibt Aufschluss über die Verteilung von Kavitationszonen. Alternativ zur Aluminiumfolie kommen auch speziell beschichtete Probekörper zum Einsatz, welche ebenfalls über einen bestimmten Zeitraum der Kavitation ausgesetzt werden. Neben dem Erosionsmuster auf der Oberfläche kann der Massenabtrag pro Zeiteinheit als Maß für die Reinigungswirkung ausgewertet werden. Der Einsatz dünner Aluminiumfolien hat sich aufgrund seiner Einfachheit und der geringen Kosten etabliert um schnell aussagekräftige Ergebnisse über die Verteilung von Kavitationszonen zu erhalten. Das Verfahren eignet sich jedoch nicht zur Überwachung der Kavitationsaktivität während des Betriebs. Zudem beeinflussen Probekörper das Schallfeld, so dass die Messergebnisse nicht ohne Weiteres auf andere Systeme übertragbar sind.

Alternativ zur Erosion kann das beim Kollaps von Kavitationsblasen emittierte Licht zur Visualisierung von Kavitationszonen genutzt werden [8, 9]. Aufgezeichnet werden diese kurzzeitig lokal auftretenden Lichtblitze durch eine Langzeitbelichtung mit einer Kamera. Als Ergebnis erhält man eine zeitliche Integration der Lichtemissionen für den Zeitraum der Belichtung. Die Helligkeitsverteilung zeigt, ähnlich wie das Erosionsmuster der Aluminiumfolie, Kavitationszonen an. Vorteilhaft bei diesem Verfahren ist, dass keine Probekörper oder Sensoren in der Flüssigkeit platziert werden müssen. Jedoch muss die Flüssigkeit transparent und optisch zugänglich sein und es muss für eine ausreichende Abdunklung gesorgt werden. Zur besseren Visualisierung werden oft Zusätze wie Luminol verwendet. Die Anwendbarkeit des Verfahrens im Betrieb ist damit stark eingeschränkt. Zudem eignet sich aufgrund der zeitlichen Integration auch dieses Verfahren nicht für prozessbegleitende Messungen.

Die extremen Drücke, Temperaturen und Aufheiz- und Abkühlraten während des Kollapses von Kavitationsblasen können chemische Reaktionen wie die Abspaltung freier Radikale auslösen. Das Produkt dieser sogenannten sonochemischen Reaktionen kann zur Bewertung der Kavitationsaktivität herangezogen werden. Als Maß für die Kavitationsaktivität dient beispielweise die Entstehung freier Radikale pro Zeiteinheit. Vorteilhaft ist, dass kein Sensor in der Flüssigkeit notwendig ist. Jedoch lässt sich die Methode nur bei bestimmten Flüssigkeiten anwenden.

Oszillierende und kollabierende Kavitationsblasen wirken als sekundäre Schallquellen. Die emittierten Schallwellen haben bestimmte charakteristische Frequenzanteile, welche als Indikatoren für das Einsetzen von Kavitation verwendet werden können. Mögliche Indikatoren sind die Amplituden bei charakteristi-

schen Frequenzen oder die Rauschleistungsdichte in einem bestimmten Frequenzbereich im Spektrum des Drucksignals. Diskrete Frequenzanteile weisen dabei auf nichtlineare Blasenoszillationen hin und ein breitbandiges Rauschen auf ihren impulsartigen Kollaps. Gemessen werden die Schallemissionen in der Regel mit Hydrophonen oder speziellen Kavitationssensoren in der Flüssigkeit. Die prozessbegleitende Messung ermöglicht die Überwachung der Kavitationsaktivität im Betrieb. Nachteilig ist die Notwendigkeit der Platzierung eines Sensors in der Flüssigkeit, da dieser den mitunter rauen Randbedingungen des jeweiligen Prozesses ausgesetzt ist und Schaden nehmen kann. Zudem beeinflussen Sensoren das Schallfeld und können zur Kontamination der zu beschallenden Flüssigkeit führen.

Die Verwendung eines Mikrofons außerhalb der Flüssigkeit ist prinzipiell ebenfalls möglich, jedoch besteht dort die Gefahr, dass hochfrequente Frequenzanteile das Mikrofon nicht erreichen und, dass das Mikrofon von externen Schallquellen beeinflusst wird [10].

Keine der bislang verfügbaren Messmethoden ermöglicht eine prozessbegleitende, rückwirkungsfreie Messung der Kavitationsaktivität unter rauen Prozessrandbedingungen. Es ist jedoch bekannt, dass das elektromechanische Klemmenverhalten von piezoelektrischen Ultraschallwandlern von deren Belastung abhängt. Es ist daher naheliegend zu untersuchen, ob die Rückwirkung der Kavitation auf die Ansteuersignale des Ultraschallwandlers Rückschlüsse über die Kavitationsaktivität zulässt. Der Aufwand dafür ist zunächst gering, da keine Modifikationen am System vorzunehmen sind, es muss lediglich das Ansteuersignal gemessen und in geeigneter Form ausgewertet werden. Daher ließe sich diese Messmethode mit geringem Aufwand bei allen Ultraschallsystemen mit eingetauchtem Ultraschallwandler anwenden und würde daher auch eine Nachrüstung bei bestehenden Systemen problemlos ermöglichen.

Die Rückwirkung eines Prozesses auf den Ultraschallwandler ist bei Applikationen wie der Bestimmung der Qualität von Drahtbondverbindungen oder der Differenzierung zwischen gesundem und tumorösem Gewebe in der Chirurgie unter dem Begriff Self-Sensing bereits bekannt [11, 12]. Im Kontext akustischer Kavitation wird in [13] die Verwendung von Impedanzmessungen an einem fokussierten Ultraschallwandler zur Analyse der Blasedynamik im Fokus des Wandlers beschrieben. In [14] wird die Rückwirkung einer Flüssigkeit auf die elektrische Eingangsimpedanz eines Ultraschallwandlers modellbasiert und experimentell untersucht und gezeigt, dass das Einsetzen von Kavitation eine messbare Änderung der Eingangsimpedanz hervorruft.

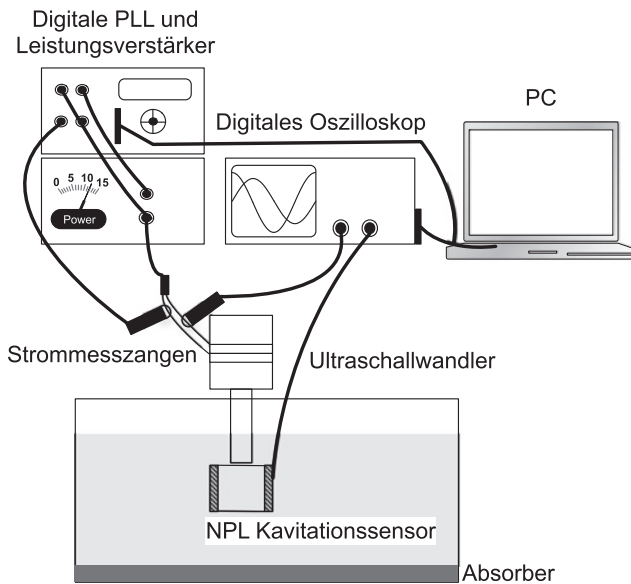
Die Überwachung der elektrischen Eingangsimpedanz ist bei den meisten Ultraschallsystemen einfach zu realisieren, da Strom und Spannung oftmals schon für die Regelung des Systems gemessen werden und somit nur eine geeignete Aufbereitung des Messsignals notwendig ist. Eine Impedanzänderung in Folge der Laständerung am Ultraschallwandler eignet sich zur Bestimmung des Einsetzens transienter Kavitation, liefert aber keine Informationen über die Kavitationsstärke oder über das Einsetzen stabiler Kavitation zur Differenzierung der Kavitationstypen. Zudem hängt die Anwendbarkeit von der Lastempfindlichkeit des Ultraschallwandlers ab. Um auch Aussagen über den Typ und die Stärke der Kavitation machen zu können, und um möglicherweise universellere Indikatoren zu finden wird in dieser Veröffentlichung das Spektrum des Stromsignals des Ultraschallwandlers auf mögliche Kavitationsindikatoren untersucht. Im Gegensatz zur elektrischen Eingangsimpedanz ermöglicht das Spektrum des Stromsignals die Analyse von nichtlinearen Anteilen, beispielsweise durch den Energietransfer in höhere Moden. In einer ersten Machbarkeitsstudie konnte bereits gezeigt werden, dass beim Einsetzen transienter Kavitation bestimmte Frequenzanteile im Spektrum des Stromsignals auftreten, welche als Indikatoren dienen können [10].

## 4 Kavitationsdetektion mittels Self-Sensing-Ultraschallwandler

### 4.1 Messaufbau und Versuchsdurchführung

Zur Identifikation möglicher Indikatoren für das Einsetzen, die Stärke und die Art der Kavitation wurden vergleichende Messungen zwischen der Rückwirkung von Kavitationsereignissen auf das Eingangsstromsignal des Ultraschallwandlers und einem Kavitationssensor vom National Physical Laboratory durchgeführt [15, 16]. Der Messaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Ein nicht fokussierender Ultraschallwandler mit einer Betriebsfrequenz von 28,5 kHz ist in ein Wasserbecken eingetaucht, an dessen Boden eine Absorptionsschicht platziert ist, um Schallreflexionen zu reduzieren. Der Ultraschallwandler wird von einem Phase-Locked-Loop-Regler, dessen Ausgangssignal mittels eines Leistungsverstärkers verstärkt wird, in Resonanz betrieben [17]. Zur Variation des Schalldrucks wird der Eingangsstrom des Ultraschallwandlers geregelt. Die zur Regelung notwendige Messung der Spannung am Ultraschallwandler sowie des in den Wandler fließenden Stroms wird durch Rückführung der Spannung und durch Messung des Stroms mittels Strommess-





**Abbildung 2:** Experimenteller Aufbau für die Vergleichsmessungen von Kavitationssensor und Self-Sensing-Ultraschallwandler.

zange (Tektronix P6021A) realisiert. Durch eine RS232-Schnittstelle können Messsignale vom digitalen Phase-Locked-Loop-Regler (PLL) während des Betriebs an einen PC übertragen und dort dargestellt werden. Es werden 10 Werte pro Sekunde (10 S/s) übertragen. Unterhalb des Ultraschallwandlers ist der Kavitationssensor platziert, welcher direkt mit einem digitalen Oszilloskop verbunden ist. Zur Auswertung der Rückwirkungen auf das Eingangsstromsignal des Ultraschallwandlers wird eine zweite Strommesszange verwendet, welche ebenfalls direkt mit dem Oszilloskop verbunden ist. Die Strommesszange liefert eine dem Strom proportionale Ausgangsspannung. Die mit dem Oszilloskop aufgenommen Messdaten werden nach der Messung zur Weiterverarbeitung auf einen PC übertragen.

Zur Analyse der Unterschiede in den aufgenommenen Signalen unter- und oberhalb der Kavitationsschwelle wird der Ultraschallwandler bei verschiedenen Eingangsstromamplituden unter- und oberhalb des Einsetzens hör- und sichtbarer Kavitation betrieben. Bei jeder vorgegebenen Eingangsstromamplitude werden die Ausgangsspannungen der Strommesszange und des Kavitationssensors synchron aufgezeichnet. Zudem werden die von der digitalen PLL an den PC übertragenen Zeitschriebe abgespeichert. Im Anschluss an die Messungen werden die mit dem digitalen Oszilloskop aufgenommenen Messsignale mittels diskreter Fouriertransformation in den Frequenzbereich transformiert, um Änderungen im Spektrum in Abhängigkeit der mittleren Eingangsstromamplitude zu identifizieren. Es wird ein weiterer Frequenzbereich zwi-

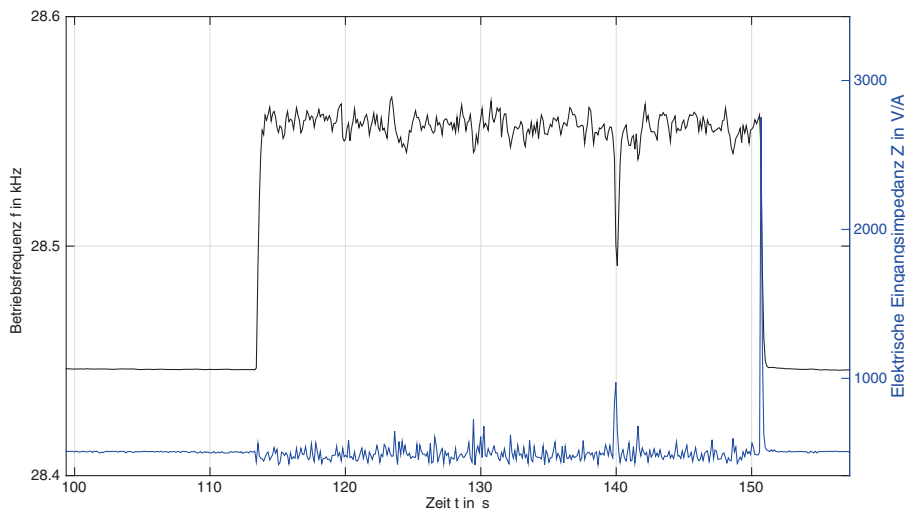
schen 100 Hz und 10 MHz analysiert, um sowohl Änderungen im Frequenzbereich um die Betriebsfrequenz des Ultraschallwandlers als auch im hochfrequenten Rauschen im MHz-Bereich analysieren zu können. Das Auftragen der Spektren über der mittleren Eingangsstromamplitude des Ultraschallwandlers wird im Kontext dieser Veröffentlichung als Spektrogramm bezeichnet. Basierend auf den Spektrogrammen werden im Anschluss potenzielle Indikatoren identifiziert und über der mittleren Eingangsstromamplitude aufgetragen, um charakteristische Merkmale wie Grenzwerte oder Tendenzen zu identifizieren, welche mit dem Auftreten und der Stärke von Kavitation korrelieren.

Als Indikatoren wurden die Amplituden bei bestimmten Frequenzen und die Rauschleistungsdichte in definierten Frequenzbereichen ausgewertet. Die Rauschleistungsdichte, in Anlehnung an [16] als *BIE* für Broadband Integrated Energy bezeichnet, wurde durch Integration des Quadrates der Spektralanteile  $U(f)$  des Messsignals über einen definierten Frequenzbereich berechnet.

$$BIE = \int_{f_1}^{f_2} |U(f)|^2 df \quad (1)$$

## 4.2 Auswertung der Ansteuersignale im Zeitbereich

Da der digitale Phase-Locked-Loop-Regler die Möglichkeit bietet die Eingangsstromamplitude, die Spannungsamplitude und die Betriebsfrequenz sowie Größen, die sich daraus ergeben wie die elektrische Eingangsimpedanz während des Betriebs am PC zu überwachen, ist es naheliegend, Änderungen in diesen Signalen direkt als mögliche Indikatoren zu nutzen. Abbildung 3 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt der aufgezeichneten Signale. Aufgetragen sind die Änderung der Betriebsfrequenz und der elektrischen Eingangsimpedanz des Ultraschallwandlers über der Zeit. Der Ultraschallwandler wurde auf eine mittlere Eingangsstromamplitude von 220 mA geregelt. Da diese nahe an der Kavitationsschwelle liegt, kam es sporadisch zum Einsetzen hör- und sichtbarer Kavitation an der Stirnseite des Ultraschallwandlers. Im Diagramm ist bei etwa  $t = 113$  s ein sprunghafter Anstieg der Betriebsfrequenz zu beobachten, welcher mit dem Auftreten von Kavitation an der Stirnseite des Ultraschallwandlers korreliert. Der Sprung zurück auf den Ausgangswert der Betriebsfrequenz bei  $t = 151$  s korreliert mit dem Stoppen der sicht- und hörbaren Kavitation. Einher mit dem Sprung in der Betriebsfrequenz des Ultraschallwandlers gehen leicht-



**Abbildung 3:** Zeitliche Änderung der Betriebsfrequenz und der elektrischen Eingangsimpedanz.

te Schwankungen der elektrischen Eingangsimpedanz des Ultraschallwandlers.

Der Anstieg der Betriebsfrequenz ist mit der Veränderung der Belastung an der Stirnseite des Ultraschallwandlers mit einsetzender Kavitation zu erklären. Mit dem Einsetzen von Kavitation bildet sich ein Gemisch aus Wasser und Kavitationsblasen und die Belastung verschiebt sich mehr in Richtung eines frei in Luft schwingenden Ultraschallwandlers. Die Schwankungen in der Impedanz sind mit den schnellen Laständerungen bei Kavitation zu erklären, welche der Regler auszugleichen versucht. Da bei der Impedanz kein deutlicher Sprung beim Einsetzen der Kavitation zu sehen ist, eignet sich in diesem Fall die Betriebsfrequenz besser als Indikator für das Einsetzen transienter Kavitation.

Für resonanzgeregelter Systeme bietet die Überwachung der Betriebsfrequenz eine einfache Möglichkeit das Einsetzen von Kavitation zu detektieren. Wie bei der Verwendung der elektrischen Eingangsimpedanz des Ultraschallwandlers ist jedoch eine Abhängigkeit von der Lastempfindlichkeit des Ultraschallwandlers zu erwarten. Ein Nachteil bei der Verwendung der Betriebsfrequenz als Indikator ist, dass diese von der Temperatur des Ultraschallwandlers abhängt, was die Kavitationsdetektion erschwert.

### 4.3 Analyse der Spektren der Messsignale

Da nicht alle Ultraschallsysteme die Möglichkeit bieten, die Messsignale des Reglers direkt zu überwachen und die Anwendbarkeit der Indikatoren vom Ultraschallwandler, von der Ansteuerung und von den Umgebungsbedingun-

gen wie der Temperatur abhängen, und die Indikatoren lediglich das Einsetzen der Kavitation, nicht jedoch die Stärke oder ihre Art anzeigen, werden weitere mögliche Indikatoren aus den Spektren der Messsignale identifiziert.

Zur Identifikation von Änderungen in den Spektren der Ausgangsspannungen der Strommesszange und des Kavitationssensors in Abhängigkeit der mittleren Eingangsstromamplitude wurden die Spektren des Kavitationssensorsignals (Abbildung 4) und des Strommesszangensignals (Abbildung 5) über der Eingangsstromamplitude aufgetragen. Ab einer mittleren Eingangsstromamplitude von 250 mA war kontinuierlich eine Kavitationswolke ausgehend von der Stirnseite des Ultraschallwandlers zu beobachten.

Das Spektrogramm des Kavitationssensorsignals weist einen ersten breitbandigen Anstieg im Rauschen zwischen 1 MHz und 8 MHz bei einer Eingangsstromamplitude von 160 mA auf. Ein deutlich massiverer Anstieg tritt bei 250 mA im Frequenzbereich unterhalb der Betriebsfrequenz  $f_0$  auf. Zudem treten ab 250 mA Sub- und Ultraharmonische der Betriebsfrequenz hervor. Der breitbandige Anstieg unterhalb der Betriebsfrequenz des Ultraschallwandlers, welcher teilweise im hörbaren Frequenzbereich liegt, deckt sich mit dem hörbaren Einsetzen eines „Kavitationsgeräusches“. Die Eingangsstromamplitude von 250 mA beschreibt den Grenzwert für das Einsetzen transienter Kavitation.

Das Spektrogramm der Ausgangsspannung der Strommesszange weist einen ersten breitbandigen Anstieg unterhalb der Betriebsfrequenz des Ultraschallwandlers bereits bei einer Eingangsstromamplitude von 160 mA auf. Mit dem Einsetzen hör- und sichtbarer Kavitation ab 250 mA treten oberhalb der Betriebsfrequenz scharfe

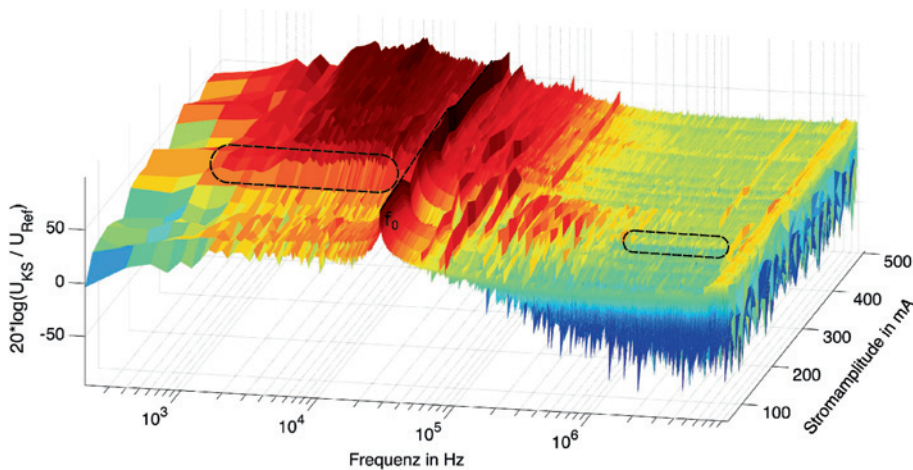


Abbildung 4: Spektrogramm: Kavitationssensorsignal (KS) in Abhängigkeit von Frequenz und mittlerer Eingangsstromamplitude.

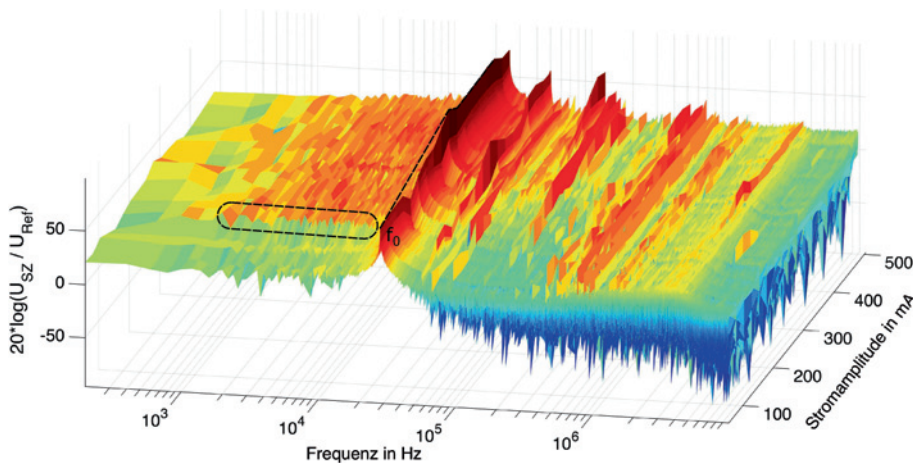


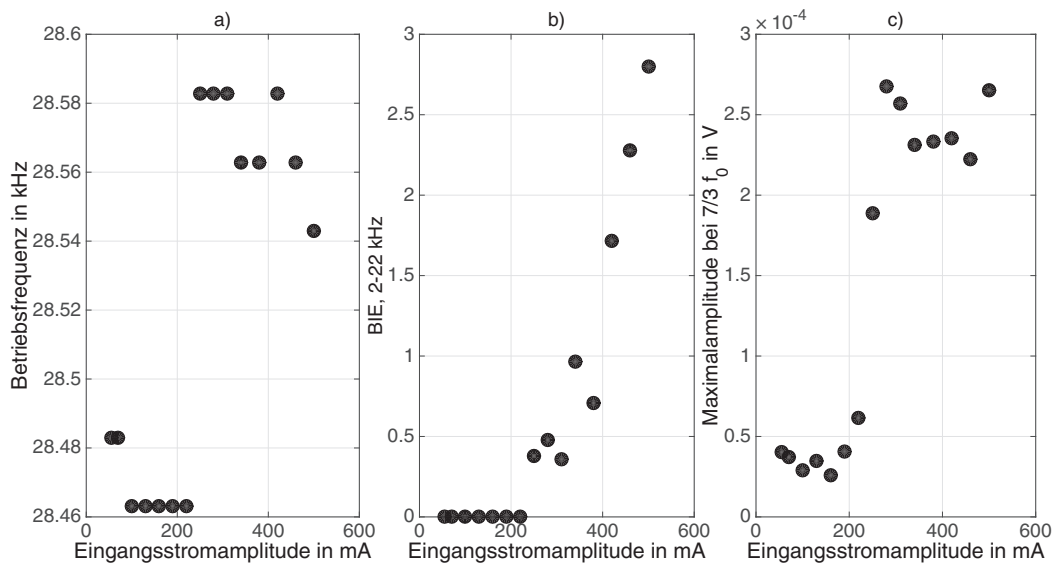
Abbildung 5: Spektrogramm: Strommessangensignal (SZ) in Abhängigkeit von Frequenz und mittlerer Eingangsstromamplitude.

Peaks auf. Im höherfrequenten Bereich ab etwa 200 kHz sind kaum Änderungen einhergehend mit einsetzen der Kavitation zu beobachten. Die im Spektrogramm des Stromsignals auftretenden Änderungen unterscheiden sich damit von den Änderungen im Spektrogramm des Kavitationssensorsignals. Dennoch korrelieren die auftretenden Peaks mit dem Einsetzen transientser Kavitation und sind somit mögliche Indikatoren.

Basierend auf den Änderungen in den Spektrogrammen wurden Indikatoren wie die Amplituden bei Sub- und Ultraharmonischen der Betriebsfrequenz sowie die Rauschleistungsdichte in bestimmten Frequenzbereichen ausgewählt und über der mittleren Eingangsstromamplitude des Ultraschallwandlers aufgetragen. Abbildung 6 zeigt eine Auswahl dieser Indikatoren. Wie bei der Überwachung der Messsignale des digitalen Reglers zeigt sich auch nach der Extraktion aus dem Spektrogramm die Betriebsfrequenz als möglicher Indikator für das Einsetzen

transientser Kavitation. Im dargestellten Diagramm wurde die Betriebsfrequenz aus dem Strommessangensignal extrahiert. Bei 250 mA tritt ein Sprung um etwa 100 Hz nach oben auf, welcher mit dem Einsetzen der Kavitationswolke korreliert. Bei weiterer Erhöhung der Eingangsstromamplitude sinkt die Betriebsfrequenz jedoch wieder, was auf eine Erwärmung des Ultraschallwandlers zurückzuführen ist, da sich dieser seiner Leistungsgrenze nähert. Das mittlere Bild zeigt die Rauschleistungsdichte unterhalb der Betriebsfrequenz des Ultraschallwandlers zwischen 2 und 22 kHz, welche aus dem Kavitationssensorsignal extrahiert wurde. Neben dem Grenzwert bei 250 mA zeigt die Rauschleistungsdichte eine weiter steigenden Tendenz und kann damit als Indikator für die Kavitationsstärke dienen. Im Strommessangensignal zeigt die Amplitude der Ultraharmonischen bei  $\frac{7}{3}f_0$  ebenfalls das Einsetzen transientser Kavitation bei 250 mA an. Oberhalb der Kavitationsschwelle stagniert der Wert jedoch,





**Abbildung 6:** Ausgewählte Indikatoren abgeleitet aus den Spektrogrammen des Strom- und Kavitationssensorsignals. a) Strommesszangensignal, b) Kavitationssensorsignal, c) Strommesszangensignal.

**Tabelle 1:** Übersicht über ausgewählte Indikatoren aus den Kavitationssensor- und Strommesszangensignalen und deren charakteristische Merkmale.

	Kavitationssensorsignal		Strommesszangensignal	
	Grenzwert	Kavitationsstärke	Grenzwert	Kavitationsstärke
Betriebsfrequenz	250 mA	nein	250 mA	nein
BIE 2–22 kHz	250 mA	ja	160 mA	nein
$\frac{1}{4} f_0$	250 mA	ja	160 mA	nein
$\frac{1}{2} f_0$	250 mA	nein	160 mA	nein
$\frac{3}{4} f_0$	250 mA	ja	160 mA	nein
$\frac{3}{2} f_0$	250 mA	nein	250 mA	nein
$\frac{7}{3} f_0$	250 mA	nein	250 mA	nein
$\frac{5}{2} f_0$	250 mA	nein	160 mA	(ja)
$\frac{7}{2} f_0$	250 mA	nein	160 mA	ja
$\frac{9}{2} f_0$	250 mA	nein	250 mA	nein
BIE 1–10 MHz	160 mA	nein	250 mA & 250 mA	nein

so dass dieser kein Maß für die Kavitationsstärke darstellt.

Eine Reihe weiterer Indikatoren wurde hinsichtlich der auftretenden Grenzwerte und Tendenzen analysiert. Eine Übersicht ist in Tabelle 1 dargestellt. Aufgetragen sind die ausgewerteten Indikatoren sowie die mittleren Eingangsstromamplituden, bei denen Grenzwerte beobachtet wurden und ob oberhalb der Grenzwerte eine weiter steigende Tendenz zu beobachten war, welche mit der Kavitationsstärke korreliert. Bis auf die Rauschleistungsdichte im Frequenzbereich zwischen 1 und 10 MHz weisen alle Indikatoren, welche aus dem Signal des Kavitationssensors ausgewählt wurden, einen Grenzwert bei

250 kHz auf. Eine Korrelation zur Kavitationsstärke zeigt sich nur bei der Rauschleistungsdichte zwischen 2 und 22 kHz und einigen Subharmonischen der Betriebsfrequenz. Die aus dem Stromsignal extrahierten Indikatoren weisen unterschiedliche Grenzwerte auf, einige bei 160 mA und andere bei 250 mA. Der Grenzwert bei 250 mA, welcher auf Basis der Kavitationssensorsignale und der Beobachtungen während der Messungen das Einsetzen transienter Kavitation anzeigt, kann durch Ultraschallharmonische der Betriebsfrequenz im Strommesszangensignal detektiert werden. Keiner dieser Indikatoren, zeigt jedoch eine weiter steigenden Tendenz an, die mit der Kavitationsstärke korreliert. Der Grenzwert bei 160 mA,

**Tabelle 2:** Vergleich von Indikatortypen zur Detektion des Einsetzens, der Stärke und des Typs von Kavitation, extrahiert aus unterschiedlichen Messaufbauten. KS – Kavitationssensorsignal, SZ – Strommesszangensignal, LFB – Rauschleistungsdichte unterhalb der Betriebsfrequenz,  $f_0$  – Betriebsfrequenz,  $f_s$  – Subharmonische der Betriebsfrequenz,  $f_u$  – Ultraharmonische der Betriebsfrequenz, HFB – hochfrequente Rauschleistungsdichte.

	Grenzwert		Kavitationsstärke		Kavitationstyp	
28,5 kHz, digitale PLL	KS SZ	LFB, $f_0$ , $f_s$ , $f_u$ , HFB LFB, $f_0$ , $f_u$ , HFB	KS SZ	LFB, $f_s$ $f_u$	KS SZ	( $f_u$ ) $f_0$ , HFB
22,5 kHz, digitale PLL	KS SZ	LFB, $f_0$ , $f_s$ , $f_u$ , HFB $f_0$ , $f_s$ , $f_u$ , HFB	KS SZ	LFB, $f_s$ , $f_u$ $f_u$	KS SZ	$f_0$ , HFB $f_0$ , HFB
22,5 kHz, analoge PLL	KS SZ	LFB, $f_0$ , $f_s$ , $f_u$ , HFB $f_0$ , $f_s$ , $f_u$ , HFB	SK	LFB	KS SZ	HFB HFB

welcher in einigen Indikatoren des Strommesszangensignals und in der Rauschleistungsdichte zwischen 1 und 10 MHz des Kavitationssensorsignals auftritt, weist aller Voraussicht nach auf das Einsetzen stabiler Kavitation hin. Zum sicheren Nachweis sind weitere Messungen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera notwendig, um den Messdaten Bilder der Blasendynamik zuzuordnen.

Das Stromsignal des Ultraschallwandlers eignet sich zur Detektion des Einsetzens transienter Kavitation und möglicherweise zur Unterscheidung zwischen stabiler und transienter Kavitation, wenn verschiedene Indikatoren, welche unterschiedliche Grenzwerte aufweisen, kombiniert werden.

## 5 Analyse der Übertragbarkeit auf andere Ultraschallsysteme

Die in Tabelle 1 dargestellten Indikatoren wurden aus den Messungen mit einem spezifischen Messaufbau identifiziert. Zur Analyse der Abhängigkeit der Indikatoren vom verwendeten Ultraschallwandler sowie der Ansteuerungselektronik wurden diese Komponenten sukzessiv ausgetauscht und der Messablauf wurde für den modifizierten Aufbau erneut durchlaufen. Zunächst wurde der bei 28,4 kHz arbeitende Ultraschallwandler durch einen bei 22,5 kHz arbeitenden Wandler ersetzt. Im Anschluss wurden der digitale Regler und der Leistungsverstärker durch einen analogen Regler mit integriertem Verstärker ausgetauscht. Ein Vergleich der Indikatoren ist in Tabelle 2 dargestellt.

Indikatoren für das Einsetzen transienter Kavitation konnten in allen drei Messaufbauten aus dem Strommesszangensignal des Ultraschallwandlers extrahiert werden.

In allen drei Messaufbauten sind die Amplituden bei Ultraharmonischen der Betriebsfrequenz. Bei den Messungen mit dem 22,5 kHz Wandler weist die aus dem Strommesszangensignal berechnete Rauschleistungsdichte im Frequenzbereich zwischen 1 und 10 MHz zwei Grenzwerte auf, welche zur Differenzierung zwischen den Kavitationstypen dienen können. Bei den Messungen mit dem 28,4 kHz Wandler ist die Differenzierung ggf. durch Kombination zweier Indikatoren mit unterschiedlichen Grenzwerten ebenfalls möglich. Bis auf einen Indikator im Aufbau mit dem 22,5 kHz Wandler und dem digitalen Regler weisen keine der aus dem Strommesszangensignal extrahierten Indikatoren neben dem Grenzwert für transiente Kavitation eine Tendenz auf, welche mit der Stärke der Kavitation korreliert. Daher ist die Verwendung des Kavitationssensors zur Bestimmung der Kavitationsstärke zu bevorzugen. Der Betrieb des 22,5 kHz Ultraschallwandlers mit dem analogen oder dem digitalen Regler führt zu Unterschieden hinsichtlich der verwendbaren Indikatoren. Neben dem Design des Ultraschallwandlers beeinflusst daher auch die elektrische Ansteuerung die verwendbaren Indikatoren. Insbesondere bei der Kombination aus digitalem Regler und Leistungsverstärker konnte ein stärkeres hochfrequentes Rauschen beobachtet werden, welches die durch Kavitation hervorgerufenen Änderungen möglicherweise überdeckt.

## 6 Zusammenfassung

Die Quantifizierung der Kavitationsaktivität ist essenziell, um kavitationsbasierte Prozesse hinsichtlich der Beschallung optimieren und die Kavitationsaktivität im Betrieb überwachen zu können. Die Messung der akustischen Emissionen von Kavitationsblasen durch Schalldrucksen-

soren ermöglicht eine prozessbegleitende Überwachung der Kavitationsaktivität. Aufgrund teilweise rauer Prozessrandbedingungen, besonders bei chemischen und verfahrenstechnischen Prozessen, ist es jedoch oftmals nicht möglich, Sensoren in der Flüssigkeit zu platzieren. Aus diesem Grund wurde die Rückwirkung des Schallfeldes und der Kavitation auf das Anregesignal eingetauchter Ultraschallwandler als alternative Methode zur Kavitationsdetektion untersucht, welche ohne zusätzlichen Sensor in der Flüssigkeit auskommt. Bei resonanzgeregelten Systemen kann die Betriebsfrequenzänderung des Ultraschallwandlers aufgrund der durch Kavitation verursachten Laständerung als Indikator für das Einsetzen transientser Kavitation dienen. Weitere Indikatoren im Spektrum des Strommesszangensignals, die mit dem Einsetzen transienter Kavitation korrelieren, sind im Wesentlichen ausgeprägte Peaks bei Utraharmonischen der Betriebsfrequenz. Die Unterscheidung zwischen transienter und stabiler Kavitation ist ebenfalls basierend auf Indikatoren aus dem Strommesszangensignal möglich, sei es durch Kombination zweier Indikatoren mit unterschiedlichen Grenzwerten oder durch einzelne Indikatoren, welche zwei Grenzwerte aufweisen.

Zur detaillierten Studie von kavitationsbasierten Prozessen und für örtlich aufgelöste Messungen sind spezielle Kavitationssensoren zu bevorzugen, welche auch die Bewertung der Kavitationsstärke erlauben. Für Prozesse unter rauen Umgebungsbedingungen oder in schwer zugänglichen Situationen bietet die Kavitationsdetektion basierend auf dem Stromsignal des Ultraschallwandlers jedoch eine einfache und hilfreiche Alternative. Sind Indikatoren für ein Ultraschallsystem identifiziert, ist die Applikation im Prozess einfach und kostengünstig realisierbar. Es eignen sich prinzipiell alle Systeme mit eingetauchten Ultraschallwandlern, so dass auch eine Nachrüstung bestehender Systeme mit geringem Aufwand möglich ist.

## Literatur

1. The European Parliament and the Council, "On the Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment", *Official Journal of the European Union*, 2003.
2. The European Parliament and the Council, "On the Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (Recast)", *Official Journal of the European Union*, pp. 88–110, 2011.
3. M. Ishikawa, Y. Kadota, N. Takiguchi, H. Hosaka, and T. Morita, "Synthesis of Nondoped Potassium Niobate Ceramics by Ultrasonic Assisted Hydrothermal Method", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 47, pp. 7673–7677, Sept. 2008.
4. Y. Kadota, M. Ishikawa, H. Hosaka, and T. Morita, "Ultrasonically assisted hydrothermal synthesis of polycrystalline PZT thin film on titanium substrate.", *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 56, pp. 9–13, Jan. 2009.
5. H. Kuttruff, *Physik und Technik des Ultraschalls*. S. Hirzel Verlag, 1988.
6. T. J. Mason, "Sonochemistry : Current Uses and Future Prospects in the Chemical and Processing Industries Author", *Phil. Trans. Royal Society Publishing*, vol. 357, no. 1751, pp. 355–369, 2011.
7. K. S. K. Suslick, Y. Didenko, M. M. M. Fang, T. Hyeon, K. K. J. Kolbeck, W. McNamara III, M. M. M. Mdeleleni, M. Wong, and W. B. M. III, "Acoustic Cavitation and Its Chemical Consequences", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 357, no. 1751, pp. 335–353, 1999.
8. H. Kuttruff, "Über den Zusammenhang zwischen der Sonolumineszenz und der Schwingungskavitation in Flüssigkeiten", *Acustica*, vol. 12, 1962.
9. L. Wang, G. Memoli, I. Butterworth, M. Hodnett, and B. Zeqiri, "Characterisation of a multi-frequency cavitation vessel", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 42, p. 012013, Dec. 2012.
10. P. Bornmann, T. Hemsel, W. Sextro, T. Maeda, and T. Morita, "Non-perturbing cavitation detection/monitoring in sonochemical reactors", *2012 IEEE International Ultrasonics Symposium*, pp. 1141–1144, Oct. 2012.
11. M. Brokelmann, J. Wallaschek, and H. Hesse, "Bond process monitoring via self-sensing piezoelectric transducers", *Proceedings of the 2004 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2004.*, vol. 00, no. c, pp. 125–129, 2004.
12. D. O. Uribe, R. Stroop, and J. Wallaschek, "Piezoelectric self-sensing system for tactile intraoperative brain tumor delineation in neurosurgery.", *Conference proceedings : ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference*, vol. 2009, pp. 737–40, Jan. 2009.
13. E. A. Neppiras and W. T. Coakley, "Acoustic Cavitation in a Focused Field in Water at 1 MHz", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 45, no. 3, pp. 341–373, 1976.
14. D. Samah, P. T. Sinaptec, and J.-F. Rouchon, "Influence of cavitation on ultrasonic piezoelectric transducers impedance: Modelling and experimentation", in *Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics (ECMSM), 2013 IEEE 11th International Workshop of*, no. 2, 2013.
15. B. Zeqiri, P. N. Gélat, M. Hodnett, and N. D. Lee, "A novel sensor for monitoring acoustic cavitation. Part I: Concept, theory, and prototype development.", *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 50, pp. 1342–50, Oct. 2003.
16. B. Zeqiri, P. N. Gélat, M. Hodnett, and N. D. Lee, "A novel sensor for monitoring acoustic cavitation. Part II: prototype performance evaluation", *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, vol. 50, pp. 1351–1362, Oct. 2003.
17. S. Mojrżisch, I. Ille, and J. Twiefel, "Driving Methods and Control Design for High Power Ultrasonic Transducers", 2012.

## Autoreninformationen



**Peter Bornmann**

Universität Paderborn, Lehrstuhl für  
Mechatronik und Dynamik, Pohlweg 47–49,  
33098 Paderborn  
[peter.bornmann@upb.de](mailto:peter.bornmann@upb.de)

Peter Bornmann studierte Maschinenbau mit dem Schwerpunkt Produktentwicklung an der Universität Paderborn. Seit November 2008 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe Mechatronik und Dynamik tätig und befasst sich mit der Auslegung, dem Aufbau und der Charakterisierung von Ultraschallsystemen.



**Dr.-Ing. Tobias Hemsel**

Universität Paderborn, Lehrstuhl für  
Mechatronik und Dynamik, Pohlweg 47–49,  
33098 Paderborn  
[tobias.hemsel@uni-paderborn.de](mailto:tobias.hemsel@uni-paderborn.de)

Tobias Hemsel, Jahrgang 1970, studierte 1990 bis 1996 Maschinenbau mit Schwerpunkt Konstruktionstechnik an der – damals noch – Universität Gesamthochschule Paderborn. Anschließend war er von 1996 bis 2001 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Mechatronik und Dynamik bei Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek. Er promovierte 2001 mit Auszeichnung und erhielt eine Dauerstelle als akademischer Rat. Tobias Hemsel ist seit 2003 akademischer Oberrat, er wurde 2003 und 2005 mit dem Forschungspreis der Universität Paderborn ausgezeichnet. Nach dem Ausscheiden von Prof. Wallaschek im April 2007 hat er bis zum Dienstantritt von Prof. Sextro im März 2009 den Lehrstuhl geleitet. Im Februar und März 2009 war Tobias Hemsel als „Visiting Professor“ an der Universität Tokio tätig. Er hat mehr als 100 wissenschaftliche Beiträge veröffentlicht.



**Prof. Walter Sextro**

Universität Paderborn, Lehrstuhl für  
Mechatronik und Dynamik, Pohlweg 47–49,  
33098 Paderborn  
[walter.sextro@uni-paderborn.de](mailto:walter.sextro@uni-paderborn.de)

Walter Sextro studierte Maschinenbau mit dem Schwerpunkt in Mechanik, Mess- und Regelungstechnik an der Leibniz Universität Hannover und am Imperial College in London. Nach seinem Studium war er als Entwicklungsingenieur und Projektkoordinator für die Auslegung und Optimierung von Bohrsträngen zur Erdöl- und Erdgasförderung bei der Firma Baker Hughes Inteq im Drilling Research Center in Celle und in Houston, Texas, verantwortlich. Er kehrte als wissenschaftlicher Mitarbeiter an die Universität Han-

nover zurück und promovierte 1997 am Institut für Mechanik zum Thema „Schwingungsverhalten von Schaufelkränzen mit Reibelementen bei Frequenzverstimmung“. Seine Dissertation wurde im Jahre 1998 mit dem „Wissenschaftspreis Hannover“ ausgezeichnet. Anschließend habilitierte er sich auf dem Gebiet der Mechanik und veröffentlichte seine Habilitationsschrift mit dem Thema „Dynamical Contact Problems with Friction: Modells, Methods, Experiments and Applications“ im Springer-Verlag. Im Februar 2004 folgte er einem Ruf als Professor an das Institut für Mechanik und Getriebelehre der Technischen Universität Graz in Österreich. Prof. Sextro hat zum 1. März 2009 die Leitung des Lehrstuhls für Mechatronik und Dynamik übernommen. Für seine Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet: „Simulation und Optimierung von innovativen Leichtbaustoffen“ erhielt er den Forschungspreis 2009 der Universität Paderborn.



**Gianluca Memoli**

National Physical Laboratory, Teddington,  
United Kingdom  
[gianluca.memoli@npl.co.uk](mailto:gianluca.memoli@npl.co.uk)

Gianluca Memoli completed his undergraduate studies in Physics at Pisa University, Italy, in 1998, with work on applied optics. In 1999 he started a PhD on multi-phase flow management for space applications (completed in 2002), which kindled his interests in bubble dynamics. Before joining NPL in 2008, he worked as a researcher for the Department of Engineering at Pisa University (2002–2003), for the Environmental Protection Agency in Tuscany (2004–2005), and for the Department of Chemical Engineering of Imperial College London (2006–2008). During these years he acquired unique expertise in solving complex problems in different fields of science and technology, often related to bubbles and/or acoustics. Gianluca is the lead or co-author of 15 papers in peer-reviewed journals and of more than 60 conference papers. He has written one book chapter and has experience supervising both PhD and Master students.



**Mark Hodnett**

National Physical Laboratory, Teddington,  
United Kingdom  
[mark.hodnett@npl.co.uk](mailto:mark.hodnett@npl.co.uk)

Mark Hodnett was awarded a BSc degree in Physics with Acoustics from the University of Surrey in 1994, and started work at NPL in July of that year, commencing NPL's research into measurement techniques for acoustic cavitation. Since then, he has also developed expertise in medical device characterisation, and collaborated on projects as diverse as aerospace NDE to the processing of sewage sludge. He has is the lead or co-author of 24 papers in peer-



reviewed journals, has written two book chapters, and currently has leadership responsibility for four staff. Mark is the current President of the Ultrasonic Industry Association, and a visiting lecturer at Hammersmith Hospital.



**Bajram Zeqiri**

National Physical Laboratory, Teddington,  
United Kingdom

**bajram.zeqiri@npl.co.uk**

Bajram Zeqiri was born in Salerno, Italy, Italy, in 1957. He joined NPL in 1984 following the completion of a PhD in solid-state chemistry at the University of Kent, Canterbury. His work at NPL has seen him contribute to the development of ultrasonic measurement techniques and standards with several topic areas, including: acoustic property of materials determination, calibration and the application of ultrasonic hydrophones, characterisation of ultrasonic power along with the development of standards for physiotherapy ultrasound equipment. Over the last ten years, his major areas of research interest have been in developing methods to characterise the essential properties of high power ultrasonic systems as used within the cleaning and sonoprocessing industries, the development of novel acoustic materials, ultrasound power measurement methods and computed tomography using ultrasound. He is an NPL Fellow and leads a team of ten engaged in developing new measurement methods and disseminating ultrasonic standards to the user community. Dr Zeqiri is a member of IEC Technical Committee 87, primarily contributing to Working Groups 8 and 3, and he is the author of nearly 60 publications in the area of ultrasonic measurement.